DBpia

논문 18-43-05-08 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '18-05 Vol.43 No.05
https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.5.833

다중 수신기 배치에 따른 수동형 바이스태틱 레이더 시스템의 표적 위치 추정 성능 분석

김 호 재•, 박 근 호*, 김 동 규*, 김 형 남°

Performance Analysis of Target Localization according to the placement of Multiple-Receivers in Passive Bistatic Radar Systems

Ho Jae Kim•, Geun-Ho Park*, Dong-Gyu Kim*, Hyoung-Nam Kim°

요 약

수동형 바이스태틱 레이더 시스템은 상용 방송신호를 이용하여 표적을 탐지 및 추정하는 레이더의 응용분야로서, 별도의 송신기 설치가 요구되지 않으며 수신기는 이동 가능하도록 설계가 된다. 수신기의 위치를 변경할 수 있기 때문에 수신기 배치에 따라 표적의 탐지 성능이 달라질 것으로 예상되며, 표적의 탐지 성능을 향상시키기 위해서 적재적소의 위치에 수신기를 배치할 필요가 있다. 또한, 일반적인 바이스태틱 레이더 시스템은 3대의 송신기와 1대의 수신기를 이용하여 표적의 위치를 추정한다. 그러나, 단일 수신기를 사용하는 환경은 하나의 송신기의 탐지 영역을 이탈하거나 수신기에서 문제가 발생할 경우 위치 추정이 불가한 상황이 발생한다. 이를 극복하고 탐지 영역을 넓히기 위해 다중 송신기-다중 수신기를 이용한 위치 추정 연구가 진행되어야 하며, 이에 본 논문은 추정 성능 분석의 척도중 하나인 CEP(circular error probable)를 이용하여 다중 송신기-다중 수신기 상황에서 수신기의 배치에 따라 표적의 위치 추정 성능 분석을 진행한다. 모의실험을 통하여 2차원 공간에서 여러 가지 수신기의 배치를 통하여 위치 추정 성능 향상을 위한 수신기 배치 조건을 제안한다.

Key Words : Passive radar, Bistatic radar, Target localization, CEP, Receiver placement

ABSTRACT

A passive bistatic radar system is an application field of radar that detects and estimates a target using commercial broadcasting signals. It does not require the installation of a transmitter and provides mobile receivers. Since the location of the receiver can be changed, it is expected that the detection performance of the target will vary depending on the arrangement of the receivers. In order to improve the detection performance of the target, it is necessary to arrange the receivers in the proper locations. A bistatic radar system usually estimates the location of a target using three transmitters and one receiver. However, in an environment using a single receiver, there arises a situation where location estimation can not be performed when a target is out of

※ 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.
※ 본 논문은 BK21플러스, IT 기반 융합산업 창의인력양성사업단에 의하여 지원되었음.
• First Author : (ORCID:0000-0002-6665-7078)Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, kkhhjj007@pusan.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Pusan National University, hnkim@pusan.ac.kr, 종신회원
* Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, {fot97311, dkcspl}@pusan.ac.kr, 학생회원
논문번호 : KICS2018-02-036, Received February 14, 2018; Revised May 1, 2018; Accepted May 8, 2018

www.dbpia.co.kr

detection region of a transmitter or when any unexpected problem occurs in a receiver. In order to overcome this problem and to broaden the detection range, location estimation based on a multiple transmitter-multiple receiver has been conisdered. In this paper, we analyze the estimation performance of the location of the target according to the placement of the receiver in the multiple transmitter-multiple receiver using CEP (circular error probable) which is one of the measures of the estimated performance analysis. Through simulations, we present a receiver arrangement for improving the performance of position estimation through the placement of several receivers in a two-dimensional space.

Ⅰ. 서 론

수동형 바이스태틱 레이더(passive bistatic radar, PBR) 시스템은 송신기와 수신기가 분리된 레이더로, FM(frequency modulation), DVB(digital video broadcasting), DAB(digital audio broadcasting), GSM(global system for mobile communications) 등의 상용 방송신호를 신호원으로 이용하여 표적을 탐지 및 추정한다[1-5]. 상용 방송신호를 사용하므로 주파수 대역 할당을 지 않고 별도의 송신기를 설치할 필요가 없으며 수신기를 이용하여 표적을 탐지할 수 있다. 또한, 송신기와 수신기가 동일한 모노스태틱 레이더에서 송/수신 신호 분리에 사용되는 초고주파 스위치나 듀플렉서를 사용하지 않기 때문에 전력 소모의 감소 및 장비의 소형화가 가능한 장점이 있다[6]. 이러한 점을 이용하여 수신기는 이동 가능하도록 설계가 된다[7]. 이처럼 바이스태틱 레이더는 수신기의 위치를 변경할 수 있기 때문에 수신기 배치에 따라 표적의 탐지 성능이 달라질 것으로 예상되며, 정확한 표적의 탐지 및 원하는 방향의 탐지 성능을 향상시키기 위해서 적재적소의 위치에 수신기를 배치할 필요가 있다.

기본적인 바이스태틱 레이더의 위치 탐지 시스템은 각 송수신기 쌍으로부터 발생하는 직접 경로 신호(direct path)와 표적 반사 신호(target echo path)의 시간차(time difference of arrival, TDOA)를 측정하여 표적의 위치를 추정한다. 이렇게 측정된 시간차 정보는 송신기와 수신기를 초점으로 하는 타원으로 나타낼 수 있고, 3개 이상의 타원을 이용하여 타원의 교점을 표적의 위치로 추정할 수 있다. 수동형 바이스태틱 레이더의 위치 추정 연구 초기에는 단일 수신기를 사용한 표적의 위치추정 연구가 진행되었으나[8,9], 단일 수신기를 사용하는 환경은 하나의 송신기에서 탐지 영역을 이탈하거나 문제가 발생할 경우 표적의 위치 추정이 불가한 상황이 발생할 수 있다. 이를 극복하고 탐지 영역을 넓히기 위해서 다중 수신기를 이용한 위치 추정 연구가 필요하며, 이에 대한 연구가 국외에서 진행되고 있다[10-13]. 다중 수신기를 이용한 위치 추정 연구는, 초기에는 수신기가 고정된 상황에서 성능 개선을 하는 연구[10-12]의 형태로 진행되었다. 최근에는 수신기의 위치와 표적의 위치 추정 성능과의 연관성에 대한 연구가 진행되기도 하였으나, 단일 송신기를 사용한 경우에 대한 연구[13]이므로 다중 송신기-단일 수신기와 동일한 문제점이 발생한다. 수동형 바이스태틱 레이더는 상용 방송신호를 사용하므로 송신기의 위치 변경이 불가능하나 수신기의 위치를 비교적 쉽게 변경할 수 있기 때문에, 이러한 이점을 이용하여 수신기 배치에 따라 표적의 위치 추정 성능을 개선할 수 있을 것으로 예상되므로 다중 송신기-다중 수신기를 이용하여 수신기 배치에 따른 표적의 위치 추정 성능 분석이 필요하다고 판단된다. 이에 본 논문은 다중 수신기 상황에서 수신기의 배치에 따른 표적의 이론적 위치 추정 성능 분석을 2차원 공간에서 수행하고, 이를 토대로 위치 추정 성능 향상을 위한 수신기 배치 조건을 제안한다. 다양한 수신기 배치 조합에 따른 표적의 추정 성능을 정량적이고 효과적으로 비교하기 위해 CEP(circular error probable) 평면을 활용한다. CEP 평면은 주어진 특정 수신기 배치에서 표적의 위치에 따른 추정 성능의 전반적인 분포 형태를 확인할 수 있다는 특징이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 바이스태틱 기하 구조를 통한 바이스태틱 거리에 대해 정리하고, 바이스태틱 거리 정보를 이용하여 CRLB (Cramer-Rao lower bound)를 유도한다. 이후 3 장에서는 위치 추정 성능 분석을 위해 2 장에서 유도한 CRLB를 이용하여 CEP를 유도한 후, 4장에서는 CEP를 이용하여 송신기 배치가 고정된 상황에서 최적의 수신기 배치 방법을 제안하며, 마지막 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

www.dbpia.co.kr

Ⅱ. 다중 송신기-다중 수신기 바이스태틱 레이더 시스템에서 위치 추정에 대한 Cramer-Rao lower bound

다중 송신기-다중 수신기 바이스태틱 레이더 시스템에서 CEP를 이용한 표적의 위치 추정 성능을 분석하기 위해 바이스태틱 레이더를 이용한 위치 추정의 CRLB 유도가 필요하며, 이를 위해 먼저 바이스태틱 기하 구조를 통하여 바이스태틱 거리 정보를 획득하여야 한다. 본 장에서는 바이스태틱 기하 구조를 통한 바이스태틱 거리에 대해 정리하고, 바이스태틱 거리 정보를 이용하여 CRLB를 유도한다.

2.1 바이스태틱 기하구조

바이스태틱 레이더는 송신기에서 직선으로 수신되는 직접경로 신호와 표적에 반사되어 수신되는 표적 반사 신호를 이용하여 표적의 위치를 추정한다. 직접경로 신호와 표적반사 신호는 송신기, 수신기, 표적의 위치에 따라 그림 1과 같이 바이스태틱 기하 구조가 형성되며, 표적의 위치에 따라 직접경로 신호와 표적 반사 신호의 도달시간 차이가 발생한다. 본 논문에서는 표적의 위치 추정 성능 분석을 위한 위치 추정 성능의 CRLB 유도에 사용되는 바이스태틱 거리 정보를 다음과 같이 정의한다[14].

그림 1과 같이 i번째 송신기 $\vec{x}_{Ti}=[x_{Ti}\ \ y_{Ti}]$, j번째 수신기 $\vec{x}_{Rj}=[x_{Rj}\ \ y_{Rj}]$, 표적 $\vec{x}=[x\ \ y]$가 위치할 경우, i번째 송신기와 j번째 수신기에 의하여 발생한 바이스태틱 거리 R_{ij}는 i번째 송신기와 표적 사이의 거리 R_{Ti} 와 표적과 j번째 수신기 사이의 거리 R_{Rj} 합으로 정의되며, 식 (1)과 같다.

$$R_{ij}=R_{Ti}+R_{Rj}=\sqrt{(x_{Ti}-x)^2+(y_{Ti}-y)^2}+\sqrt{(x-x_{Rj})^2+(y-y_{Rj})^2}. \quad (1)$$

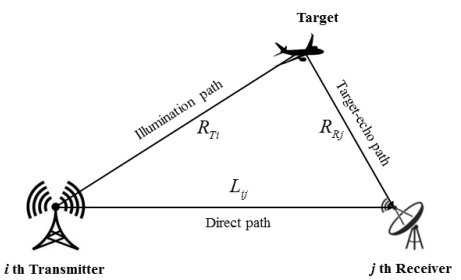


그림 1. 바이스태틱 기하 구조
Fig. 1. Bistatic geometry.

한 쌍의 송수신기를 통하여 획득한 바이스태틱 거리 정보는 그림 2와 같이 송신기와 수신기를 초점으로 하는 바이스태틱 거리가 일정한 점들의 집합인 타원으로 표현 가능하며, 이 타원 위에 표적이 존재한다. 이 때, 표적의 위치를 추정하기 위해서 최소 3 쌍의 송수신기에서 획득한 바이스태틱 거리 정보가 필요하며, 획득한 바이스태틱 거리 정보를 이용하여 바이스태틱 거리 타원의 교점을 표적의 위치로 추정한다. 앞서 정의한 바이스태틱 거리 정보를 사용하여 다중 송신기-다중 수신기 바이스태틱 레이더 시스템의 표적의 위치 추정에 대한 CRLB를 유도할 수 있다.

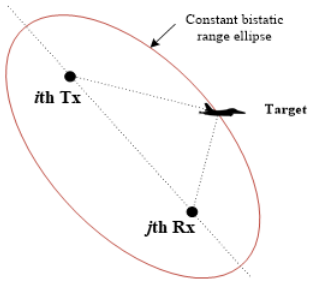


그림 2. 바이스태틱 거리 타원
Fig. 2. Bistatic range ellipse.

2.2 Cramer-Rao Lower Bound

신호모델과 오차요인의 확률 특성에 의해 관측모델의 확률밀도함수가 주어진 경우, 비편향 추정기(unbiased estimator)의 최소 분산 값은 CRLB 에 의해 결정된다[15]. 이러한 CRLB를 이용하여 송신기와 수신기의 배치에 따른 위치 추정 오차에 대한 이론적인 성능 분석이 가능하다. CRLB는 피셔 정보 행렬(Fisher information matrix, FIM)의 역행렬으로 유도 가능하며, 먼저 피셔 정보 행렬을 유도할 필요가 있다. 추정할 대상의 행렬을 $\boldsymbol{\theta}$, 측정 값 행렬을 $\vec{\boldsymbol{x}}$, 측정 값의 확률밀도함수를 $p(\vec{\boldsymbol{x}};\boldsymbol{\theta})$라 하면 피셔 정보 행렬의 성분은 식 (2)와 같다[15].

$$[\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta})]_{ij}=-E\left[\frac{\partial^2 \ln p(\vec{\boldsymbol{x}};\boldsymbol{\theta})}{\partial\theta_i\partial\theta_j}\right]. \quad (2)$$

이 때 측정 값 $\vec{\boldsymbol{x}}$가 추정할 대상 $\boldsymbol{\theta}$에 대해 평균 $\boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{\theta})$와 공분산 $\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta})$를 가지는 정규 분포라고 가정하면 피셔 정보 행렬은 식 (3)과 같이 다시 정의할 수 있다.

www.dbpia.co.kr

$$[\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta})]_{ij} = \left[\frac{\partial \boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i}\right]^T \mathbf{C}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \left[\frac{\partial \boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j}\right] + \frac{1}{2} tr\left[\mathbf{C}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \frac{\partial \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} \mathbf{C}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \frac{\partial \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j}\right]. \quad (3)$$

앞서 정의한 피셔 정보 행렬을 참고하여 다중 송신기 - 다중 수신기 상황에서의 위치 추정 성능의 CRLB를 구하기 위해, M개의 송신기와 N개의 수신기가 배치된 상황에서 송수신기 쌍으로부터 정의되는 바이스태틱 거리 벡터를 식 (4)의 $\mathbf{R}$로 정의한다.

$$\mathbf{R} = [R_{11} R_{12} \cdots R_{1N} R_{21} \cdots R_{2N} \cdots R_{MN}]^T. \quad (4)$$

표적의 위치 $\vec{\boldsymbol{x}}$에서 정의되는 바이스태틱 거리 벡터를 $\mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})$로 정의하면, 수신기에 측정된 바이스태틱 거리 벡터 $\mathbf{R}_a$는 $\mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})$와 잡음 $\mathbf{n}$의 합으로 표현되며 이는 식 (5)와 같다.

$$\mathbf{R}_a = \mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}}) + \mathbf{n}. \quad (5)$$

여기에서 잡음 $\mathbf{n}$은 평균이 0이며 식 (6)과 같이 공분산 $\mathbf{C}$를 가지는 정규 분포라고 가정한다.

$$\mathbf{C} = diag([\sigma_{11}^2 \sigma_{12}^2 \cdots \sigma_{1N}^2 \sigma_{21}^2 \cdots \sigma_{2N}^2 \cdots \sigma_{MN}^2]). \quad (6)$$

σ_{kl}^2는 k번째 송신기와 l번째 수신기에 의하여 발생한 바이스태틱 거리 측정값의 분산을 나타낸다. 측정값 $\mathbf{R}_a$는 평균 $\mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})$와 공분산 $\mathbf{C}$를 가지는 정규분포를 따르며, 식 (3)의 피셔 정보 함수에 대입하여 다중 송신기와 다중 수신기 상황에서의 피셔 정보 행렬의 성분을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\mathbf{I}(\vec{\boldsymbol{x}})]_{ij} = \left[\frac{\partial \mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})}{\partial [\vec{\boldsymbol{x}}]_i}\right]^T \mathbf{C}^{-1} \left[\frac{\partial \mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})}{\partial [\vec{\boldsymbol{x}}]_j}\right]. \quad (7)$$

식 (3)의 피셔 정보 함수의 두 번째 항은 측정값이 공분산 $\mathbf{C}$인 정규 분포를 가지기 때문에 0이 되어 식 (7)과 같이 나타난다[15]. 식 (7)의 미분 항을 자코비안 행렬로 나타내면 식 (8)과 같이 정의되며

$$[\mathbf{H}]_{i1} = \frac{\partial [\mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})]_i}{\partial x_t}, \quad [\mathbf{H}]_{i2} = \frac{\partial [\mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})]_i}{\partial y_t}, \quad (8)$$

최종적인 CRLB는 자코비안 행렬 $\mathbf{H}$와 공분산 $\mathbf{C}$로 나타낼 수 있고, 이는 식 (9)와 같다.

$$\mathbf{C}_{CRLB}(\vec{\boldsymbol{x}}) = \mathbf{I}(\vec{\boldsymbol{x}})^{-1} = (\mathbf{H}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H})^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{x,CRLB}^2 & \sigma_{xy,CRLB} \\ \sigma_{xy,CRLB} & \sigma_{y,CRLB}^2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Ⅲ. CEP를 이용한 다중 송신기-다중 수신기 바이스태틱 레이더 시스템의 위치 추정 성능 분석

위치 추정 성능 분석에 사용되는 추정치 중 하나인 오차 타원은 CRLB의 고유치와 고유벡터를 이용하여 유도한다. 추정 파라미터가 2개인 경우 2차원 평면상에 오차타원을 도시할 수 있으며, 이를 통해 신호원의 기하학적 배치 및 속도에 의한 추정치의 공간적 분포 특성을 보다 직관적으로 분석할 수 있다. 오차타원을 도시하기 위하여 식 (10)에서 CRLB의 고유 값 λ_1, λ_2와 고유벡터 행렬 $\mathbf{Q}$를 구한다[16,17].

$$\mathbf{C}_{CRLB}(\vec{\boldsymbol{x}}) = \mathbf{Q} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{Q}^T = [\mathbf{q}_1 \ \mathbf{q}_2] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^T \\ \mathbf{q}_2^T \end{bmatrix}. \quad (10)$$

고유벡터 $\mathbf{q}_1$,$\mathbf{q}_2$는 직교하며 각각의 벡터는 타원의 장축과 단축 방향을 나타낸다[16,17]. 고유 값과 고유 벡터를 이용하여 그림 3과 같이 오차 타원을 그릴 수 있다. 그림 3의 κ는 표면으로 둘러싸인 n 차원 영역의 크기를 결정하는 상수이며 현재 상황에서는

2차원 타원의 크기를 결정하는 상수이며 식 (11)과 같이 정의된다[16,17].

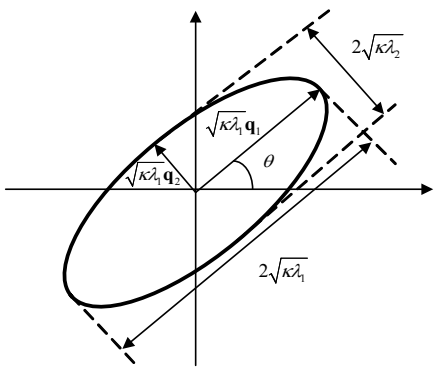


그림 3. 고유 값 및 고유 벡터에 따른 오차 타원
Fig. 3. Error ellipse according to eigenvalues and eigenvectors.

www.dbpia.co.kr

$$\kappa = [\mathbf{R}_a - \mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})]^T \mathbf{C}^{-1} [\mathbf{R}_a - \mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})]. \quad (11)$$

이를 통해 오차타원의 장축과 단축의 방향은 고유 벡터에 의해 정해지며, 장축과 단축의 길이는 고유 값과 κ에 의해 결정된다. 송신기와 수신기의 배치가 정해지면 오차타원을 통해 표적의 추정 성능을 분석할 수 있지만, 특정 위치에서의 추정 성능만 분석이 가능하다. 전 방위적인 위치 추정 성능 분석을 위해 본 논문에서는 오차타원을 근사화시킨 CEP를 사용하여 위치 추정 성능을 분석한다.

오차 타원의 장축의 길이를 a, 단축의 길이를 b라고 하였을 경우, 장축과 단축의 길이는 고유 값 λ_1, λ_2의 양의 제곱근이며, 오차 타원의 장축과 단축의 길이를 이용하여 유도한 CEP값은 식 (12)와 같다[16,17].

$$\mathbf{CEP} \cong 0.75\sqrt{a^2 + b^2} \quad (11)$$

최종 유도된 CEP 값은 그림 4와 같이 원의 반지름을 나타내며, CEP값이 작을수록 위치 추정 성능이 우수함을 의미한다. 특정 위치에서의 추정 성능을 분석할 수 있는 오차타원과는 다르게, CEP는 원의 반지름 정보만을 가지고 있기 때문에 송신기와 수신기의 기하학적 배치가 정해지면 모든 위치의 CEP값을 비교할 수 있고, 상대적으로 어느 위치에서 추정 성능이 우수한지 쉽게 분석이 가능하다. 이렇게 구한 CEP를 이용하여 다중 송신기-다중 수신기 상황에서 송신기 배치에 따라 최적의 수신기 배치 방법을 제안한다.

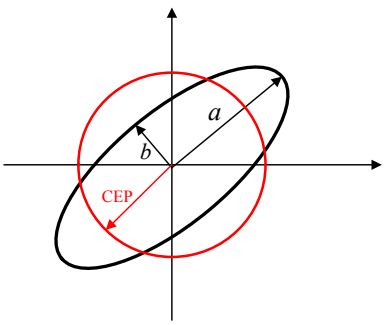


그림 4 오차 타원 및 CEP
Fig. 4. Error ellipse and CEP.

Ⅳ. CEP를 이용한 수신기 배치에 따른 모의실험 결과

본 장에서는 앞서 유도한 CEP를 이용하여 2차원에서 송신기 배치에 따른 최적의 수신기 배치 방법을 제시한다. 실제 송수신기 배치 조합은 무수히 많은 경우가 발생하므로 그림 5와 같이 송신기 및 수신기 배치를 제한하여 위치 추정 성능을 분석한다. 우리나라의 FM 송신기는 약 40 ~ 60 km 거리를 두고 배치되어 있기 때문에 송신기간 거리는 50 km로 고정을 한 후 위치 추정 성능을 분석한다. 수신기는 송신기의 중점에서 50 km 반경에 배치하며 45 도 간격으로 배치하도록 가정한다. 송신기의 위치는 $\mathbf{x}_{T1} = [-25\ \ 0]$ km, $\mathbf{x}_{T2} = [25\ \ 0]$ km로 고정하였고, 바이스태틱 거리 오차는 150 m로 고정시킨 상황에서 모의실험을 진행하였다.

먼저 송신기와 수신기의 연결선이 교차하는 경우이다. 그림 6 (a)는 수신기가 $\mathbf{x}_{R1} = [0\ \ 50]$ km, $\mathbf{x}_{R2} = [25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}]$ km에 수신기를 배치하였으며, 그림 6 (b)는 $\mathbf{x}_{R1} = [-25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}]$ km, $\mathbf{x}_{R2} = [25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}]$ km에 수신기를 배치하여 모의실험을 진행하였다. 수신기를 그림 6과 같이 배치할 경우 송신기와 수신기를 연결하는 연결선이 교차하는 구간에서 위치 추정 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 송수신기의 연결선 위에 표적이 위치할 경우 CRLB가 증가하여 CEP 값이 증가하게 된다. 식 (13), (14)는 k번째 송신기와 l번째 수신기의 연결선 위에 표적이 존재할 경우 i번째 자코비안 행렬 성분을 나타낸다.

$$[\mathbf{H}]_{i1} = \frac{\partial [\mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})]_i}{\partial x_t} = -\frac{(x_{Tk} - x_t)}{\sqrt{(x_{Tk} - x_t)^2 + (y_{Tk} - y_t)^2}} + \frac{(x_t - x_{Rl})}{\sqrt{(x_t - x_{Rl})^2 + (y_t - y_{Rl})^2}} = 0, \quad (13)$$

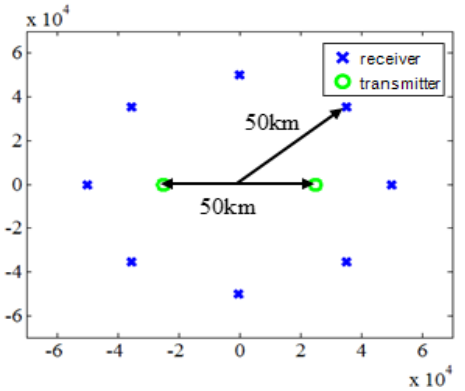
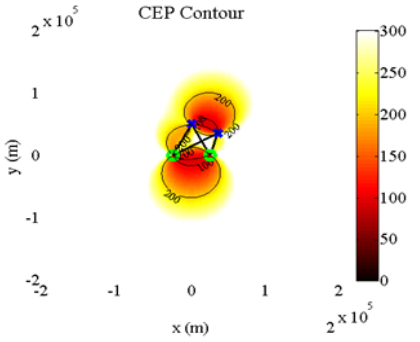
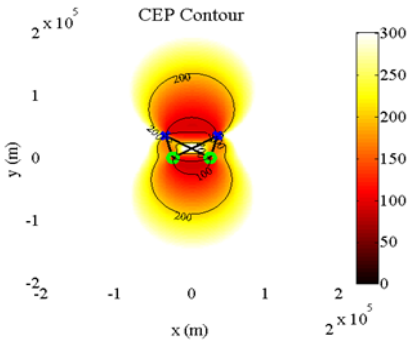


그림 5. 송신기 및 수신기 배치도
Fig. 5. Error ellipse and CEP.

www.dbpia.co.kr



(a)



(b)

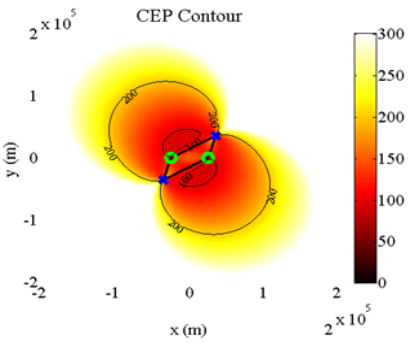
그림 6. 송신기와 수신기의 연결선이 교차하는 경우의 CEP 등고선 (a) 수신기 위치 : $\mathbf{x}_{R1}=[0\ 50]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}\,]$ km (b) 수신기 위치 : $\mathbf{x}_{R1}=[-25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}\,]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}\,]$ km

Fig. 6. The CEP contour when the lines connecting the transmitter and the receiver intersects (a) location of receivers : $\mathbf{x}_{R1}=[0\ 50]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}\,]$ km (b) location of receivers : $\mathbf{x}_{R1}=[-25\sqrt{2}\quad 25\sqrt{2}\,]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}\,]$ km.

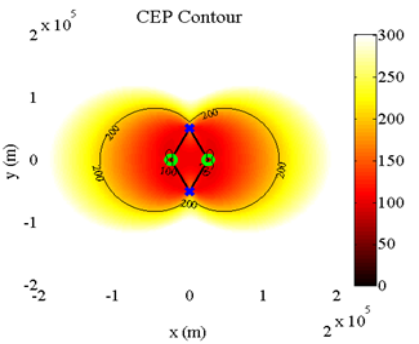
$$
\begin{aligned}
[\mathbf{H}]_{i2} &= \frac{\partial[\mathbf{R}(\vec{\boldsymbol{x}})]_i}{\partial y_t} \\
&= -\frac{(y_{Tk}-y_t)}{\sqrt{(x_{Tk}-x_t)^2+(y_{Tk}-y_t)^2}} \\
&\quad + \frac{(y_t-y_{Rl})}{\sqrt{(x_t-x_{Rl})^2+(y_t-y_{Rl})^2}} = 0.
\end{aligned} \tag{14}
$$

송수신기 연결선 위에 표적이 위치할 경우 식 (13), (14)의 k번째 송신기와 l번째 수신기로 생성되는 i번째 자코비안 행렬 성분 첫 번째 항과 두 번째 항의 값이 동일하며 부호가 다르기 때문에, i번째 행의 자코비안 성분이 0이 되면서 FIM 성분들의 값이 감소한다. 이에 따라, FIM의 역행렬인 CRLB 성분 값이 증가하게 되고 그 결과 CEP가 증가하여 위치 추정 성능이 다른 지역에 비하여 저하된다. 특히 송수신기 연결선이 교차되는 지점에서 자코비안 성분이 0이 되는 행의 수가 증가함에 따라 CEP가 증가하기 때문에 추정 성능이 열화되는 것을 그림 6에서 확인할 수 있다.

추정 성능이 열화되는 지역을 개선하기 위해, 송수신기 연결선이 교차하지 않는 상황에서 모의실험을 진행하였다. 그림 7 (a)는 수신기가 $\mathbf{x}_{R1}=[25\sqrt{2}\ 25\sqrt{2}\,]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[-25\sqrt{2}\ -25\sqrt{2}\,]$ km에 수신기를 배치하였으며, 그림 7 (b)는 $\mathbf{x}_{R1}=[0\ 50]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[0\ -50]$ km에 수신기를 배치하여 모의실험을 진행하였다. 그림 7과 같이 송수신기 연결선이 교차되지 않도록 수신기를 배치할 경우 그림 6에서 수행한 모의실험과 달리 성능 열화가 생기는 구간이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 7. 송신기와 수신기의 연결선이 교차하지 않는 경우의 CEP 등고선 (a) 수신기 위치 : $\mathbf{x}_{R1}=[25\sqrt{2}\ 25\sqrt{2}\,]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[-25\sqrt{2}\ \ -25\sqrt{2}\,]$ km (b) 수신기 위치 : $\mathbf{x}_{R1}=[0\ 50]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[0\ -50]$ km

Fig. 7. The CEP contour when lines connecting transmitter and receiver do not intersect (a) location of receivers : $\mathbf{x}_{R1}=[25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}\,]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[-25\sqrt{2}\ -25\sqrt{2}\,]$ km (b) location of receivers : $\mathbf{x}_{R1}=[0\ 50]$ km, $\mathbf{x}_{R2}=[0\ -50]$ km.

www.dbpia.co.kr

다음은 그림 6 (a)에서 진행한 송수신기 연결선이 교차하는 상황에서 한 대의 수신기를 추가하여 위치 추정 성능을 개선하는 실험을 진행하였다. 그림 8은 각각 세 번째 수신기를 (a) $\mathbf{x}_{R3}=[-25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}]$ km, (b) $\mathbf{x}_{R3}=[-50\ \ 0]$ km, (c) $\mathbf{x}_{R3}=[-25\sqrt{2}\ \ -25\sqrt{2}]$ km, (d) $\mathbf{x}_{R3}=[25\sqrt{2}\ \ -25\sqrt{2}]$ km 에 추가 배치하였다. 그림 8 (a)의 모의실험은 그림 6 (a)에서 진행한 모의실험에 비하여 연결선이 교차하는 부분에서 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있으나, 여전히 다른 지역에 비하여 추정 성능의 열화가 발생한다. 그림 8 (b)의 모의실험은 그림 8 (a)의 모의실험에 비하여 성능이 개선된 것을 확인할 수 있지만, 세 번째 수신기와 두 송신기를 잇는 연결선이 겹치기 때문에, 겹치는 구간에서 성능이 열화되는 것을 확인할 수 있다. 반면, 그림 8 (c), (d)는 연결선이 교차하지 않도록 수신기를 배치함으로써 기존에 배치되었던 수신기로 인하여 발생한 성능 열화가 개선되는 것을 확인할 수 있다.

앞서 실험한 결과를 바탕으로 수신기 2 대를 사용할 경우에는 가능한 송수신기 연결선이 교차하지 않는 방향으로 수신기를 배치하는 것이 위치 추정 성능이 우수하다. 만약, 수신기 2 대의 배치가 송수신기 연결선이 교차하도록 배치된 경우 추가 수신기의 위치에 따라서 충분히 성능을 개선시킬 수 있다. 앞서 실험한 결과들은 전반적으로 수신기간 연결선 및 송신기간 연결선에 수직한 방향의 위치 추정 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 바이스태틱 거리 타원으로부터 발생하는 오차의 영역이 추정 성능에 영향을 받기 때문이다. 그림 10과 같이 수신기간 연결선 및 송신기간 연결선에 수직한 방향의 위치에서는 그림 9에 비하여 상대적으로 큰 타원 교차각이 발생하며, 이는 수신기간 연결선 또는 송신기간 연결선 위치보다 상대적으로 작은 오차 영역이 발생하므로 성

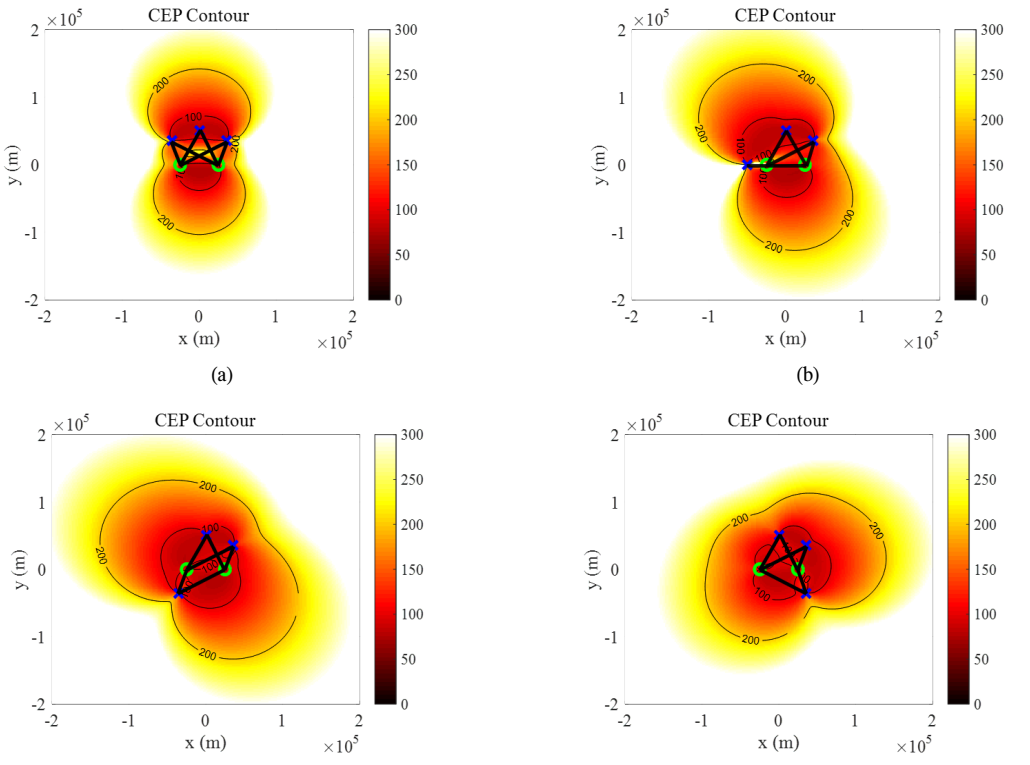


그림 8. 3대의 수신기를 사용한 경우의 CEP 등고선 (그림 6 (a) 상황에서 수신기 1대 추가) (a) 추가 수신기 : $\mathbf{x}_{R3}=[-25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}]$ km (b) 추가 수신기 : $\mathbf{x}_{R3}=[-50\ 0]$ km, (c) 추가 수신기 : $\mathbf{x}_{R3}=[-25\sqrt{2}\ \ -25\sqrt{2}]$ km, (d) 추가 수신기 : $\mathbf{x}_{R3}=[25\sqrt{2}\ \ -25\sqrt{2}]$ km.

Fig. 8. The CEP contour when three receivers are used (one receiver is added In Fig. 6 (a)) (a) additional receiver : $\mathbf{x}_{R3}=[-25\sqrt{2}\ \ 25\sqrt{2}]$ km (b) additional receiver : $\mathbf{x}_{R3}=[-50\ 0]$ km, (c) additional receiver : $\mathbf{x}_{R3}=[-25\sqrt{2}\ \ -25\sqrt{2}]$ km, (d) additional receiver : $\mathbf{x}_{R3}=[25\sqrt{2}\ \ -25\sqrt{2}]$ km

www.dbpia.co.kr

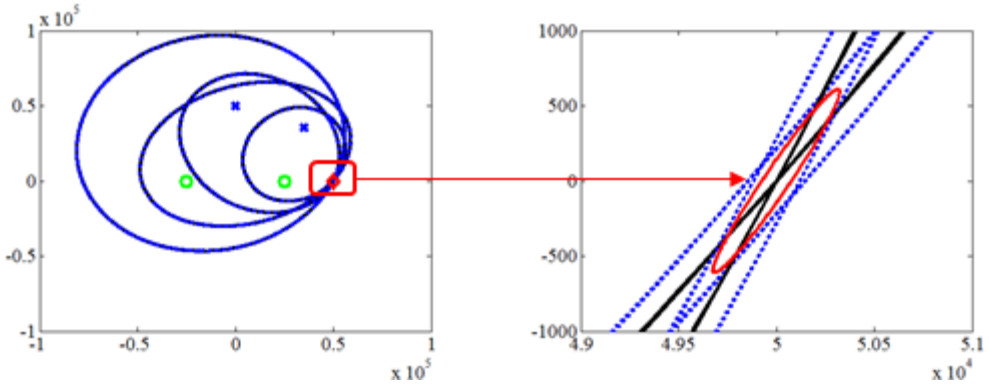


그림 9. 송신기의 연결선 방향에서의 오차 타원
Fig. 9. Error ellipse in the direction of the connecting line of the transmitter.

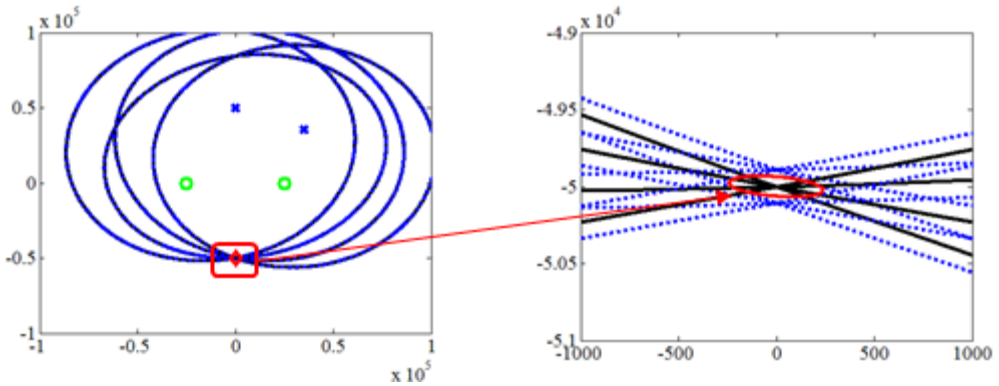


그림 10. 송신기 연결선의 수직한 방향에서의 오차 타원
Fig. 10. Error ellipse in the perpendicular direction of the transmitter line.

능이 우수한 것을 그림 6 (a)를 통하여 확인할 수 있다. 이를 통하여 특정 위치의 성능을 개선하기 위해서는 그 위치가 송신기의 연결선 또는 수신기의 연결선에 수직한 방향이 되도록 수신기를 배치할 필요가 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 2 차원의 다중 수신기 상황에서 수신기 배치 방법에 따른 위치 추정 성능을 자코비안 행렬을 활용하여 수식적으로 보이고, 이를 실험적으로 확인하였다. 그 결과, 바이스태틱 레이더 상황에서 표적의 위치가 송신기와 수신기의 연결선 위에 존재할 경우 CEP 값이 증가함을 확인하였고, 특히 송신기와 수신기의 연결선이 교차하는 지점에서는 위치 추정 성능이 열화되는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 수신기 2 대를 사용할 경우 송수신기 연결선이 교차하지 않도록 수신기를 배치하는 것이 위치 추정 성능이 우수하며, 수신기 2 대의 배치가 송수신기 연결선이 교차하도록 배치된 경우 추가 수신기의 위치에 따라서 충분히 성능을 개선시킬 수 있다. 또한, 전반적으로 수신기 사이의 연결선과 송신기 사이의 연결선에 수직한 방향의 위치 추정 성능이 상대적으로 우수한 것을 확인하였다. 이를 통하여 특정 위치의 성능을 개선하기 위해서는 그 위치가 송신기의 연결선 또는 수신기의 연결선에 수직한 방향이 되도록 수신기를 배치할 필요가 있다. 이러한 연구 결과는 다중 수신기를 배치하는 멀티스태틱 레이더 운용 환경에서 효과적인 위치 추정 성능을 달성하기 위한 방안의 하나로서 활용될 것으로 기대된다.

References

[1] H. D. Griffiths and C. J. Baker, "Passive

www.dbpia.co.kr

coherent location radar systems part 1: performance prediction," *IET Proc. Radar Sonar Navig.*, vol. 152, no. 3, pp. 153-159, Jun. 2005.

[2] G. H Park, D. G Kim, H. J. Kim, J. O. Park, W. J. Lee, J. H. Ko, and H.-N. Kim, "Performance analysis of interference cancellation algorithms for an FM based PCL system," *J. KICS*, vol. 42, no. 04, pp. 819-830, Apr. 2017.

[3] T. Peto, L. Dudas, and R. Seller, "DVB-T based passive radar," *2014 24th Int. Conf. Radioelektronika*, Bratislava, Slovakia, Jun. 2014.

[4] Y. L. Lim, "A radar signal simulator for DAB based passive radar," *RADAR 2009*, Bordeaux, France, Oct. 2009.

[5] B. Demissie, "Clutter cancellation in passive radar using GSM broadcast channels," *IET Radar Sonar & Navig.*, vol. 8, no. 7, pp. 787-796, Jul. 2014.

[6] J. M. Yang, M. J. Lee, J. R. Yun, and W. W. Kim, "Analysis of system instability factors in a bistatic radar," *J. KIMST*, vol. 14, no. 1, pp. 114-122, Feb. 2011.

[7] N. J. Wills and H. D. Griffiths, *Advances in Bistatic Radar*, SciTech Inc., 2007.

[8] M. Malanowski, K. Kulpa, and R. Suchozebrski, "Two-stage tracking algorithm for passive radar," in *Proc. 12th FUSION '09*, pp. 1800-1806, 2009.

[9] R. E. Umbach and L. K. Patton, "A two-stage tracker for passive multistatic radar," *2014 IEEE Radar Conf.,* Cincinnati, OH, USA, May 2014.

[10] A. Noroozi and M. A. Sebt, "Weighted least squares target location estimation in multi-transmitter multi-receiver passive radar using bistatic range measurements," *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 10, no. 6, pp. 1088-1097, Jun. 2016.

[11] A. Noroozi and M. A. Sebt, "Target localization from bistatic range measurements in multi-transmitter multi-receiver passive radar," *IEEE Sign. Process. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 2445-2449, Dec. 2015.

[12] A. Noroozi and M. A. Sebt, "Target localization in multistatic passive radar using SVD approach for eliminating the nuisance parameters," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 53, no. 4, Aug. 2017.

[13] H. S. Yang, J. H. Chun, and D. Y. Chae, "Two-stage localization method in multistatic radar systems," *2014 IEEE Radar Conf.,* Cincinnati, OH, USA, May 2014.

[14] R. A. Sevimli, "Target detection and imaging on passive bistatic radar systems," M.S. thesis, Department of electrical and electronics engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey, Sept. 2014.

[15] S. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Prentice Hall, 1993.

[16] D. Torrieri, "Statistical theory of passive location systems," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 183-198, Mar. 1984.

[17] D. G. Kim, Y. H. Kim, J. W. Han, K. H. Song, and H.-N. Kim, "Emitter geolocation based on TDOA/FDOA measurements and its analysis," *J. KICS*, vol. 38, no. 9, pp. 746-756, Sept. 2013.

김 호 재 (Ho Jae Kim)

2015년 2월 : 부산대학교 전자전기공학부 학사 졸업

2017년 2월 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사 졸업

2017년 3월~현재 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 박사 과정

<관심분야> 디지털 방송신호처리, 레이더 신호처리

www.dbpia.co.kr

박 근 호 (Geun-Ho Park)

2013년 2월 : 부산대학교 전자전기공학부 학사 졸업
2015년 2월 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사 졸업
2015년 3월~현재 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 박사 과정

<관심분야> 레이더 신호처리, 배열 신호처리

김 동 규 (Dong-Gyu Kim)

2011년 2월 : 부산대학교 전자전기공학부 학사 졸업
2018년 2월 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사 졸업
2018년 3월~현재 : 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신연구소 박사 후 연구원

<관심분야> 전자전 및 레이더 신호처리, 배열 신호처리

김 형 남 (Hyoung-Nam Kim)

1993년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 학사 졸업
1995년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사 졸업
2000년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사 졸업
2000년 5월 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 박사 후 연구원
2000년 5월~2003년 2월 : 한국전자통신연구원 무선방송연구소 선임 연구원
2003년 3월~2007년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학부 조교수
2007년 3월~2012년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학부 부교수
2009년 2월~2010년 2월 : Johns Hopkins Univ. Visiting Scholar
2015년 9월~2016년 8월 : Univ. of Southampton Visiting Professor
2012년~현재 : 부산대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 적응신호처리, 레이더 및 소나 신호처리, 디지털 방송 신호처리, 생체 신호처리

www.dbpia.co.kr